



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 197 27 402 A 1**

⑤1 Int. Cl.⁶:
G 01 J 9/02
G 01 B 9/02
G 01 N 21/64
G 01 N 21/45

②1 Aktenzeichen: 197 27 402.1
②2 Anmeldetag: 27. 6. 97
④3 Offenlegungstag: 26. 2. 98

DE 197 27 402 A 1

③0 Unionspriorität:

700112 20.08.96 US

⑦1 Anmelder:

Zygo Corp., Middlefield, Conn., US

⑦4 Vertreter:

G. Koch und Kollegen, 80339 München

⑦2 Erfinder:

Hill, Henry Allen, Tucson, Ariz., US; Groot, Peter de,
Middletown, Conn., US

⑤4 Überlagerungsverfahren und Vorrichtung zur Messung des Brechungsindex von Luft unter Benutzung der Mehrfach-Interferometrie

- ⑤7 Ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Messung von Fluktuationen im Brechungsindex eines Gases, beispielsweise Luft, in einem Meßpfad können benutzt werden, um die Versetzung eines Gegenstandes unabhängig von diesen Fluktuationen zu messen. Eine kohärente Lichtquelle liefert zwei Quelllichtstrahlen mit Quellenwellenlängen λ_1 , λ_2 längs des Meßpfades, die im wesentlichen harmonisch aufeinander bezogen sind. Die Strahlen werden elektronisch verarbeitet, um modifizierte heterodyne Phasenverschiebungen zu erzeugen, die auf den vorgesehenen Quellenwellenlängen basieren, die in gleicher Weise harmonisch auf die harmonisch bezogenen Quellenwellenlängen bezogen sind, um eine superheterodyne Modulationsphase zu erzeugen, die im wesentlichen unempfindlich gegenüber einer Bewegung längs des Meßpfades ist.

DE 197 27 402 A 1

2

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 01. 98 702 069/513

17/25

THIS PAGE BLANK (USFO)

Technisches Gebiet der Erfindung

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf optische Instrumente zur Messung des Abstands und des Brechungsindex. Insbesondere bezieht sich die Erfindung auf eine interferometrische Abstandsmessung unabhängig von Fluktuationen im Brechungsindex eines Gases im Meßpfad.

Hintergrund und Stand der Technik

Ein häufig in der Metrologie anzutreffendes Problem ist die Messung des Brechungsindex einer Luftsäule. Es gibt die verschiedensten Techniken zur Messung des Brechungsindex unter genau kontrollierten Umständen, wenn beispielsweise die Luftsäule in einer Probenzelle angeordnet und im Hinblick auf Temperatur, Druck und physikalische Abmessung überwacht wird. In diesem Zusammenhang wird beispielsweise auf den Artikel "An air refractometer for interference length metrology" von J. Terrien in: *Metrologia* 1(3), 80—83 (1965), verwiesen.

Vielleicht die schwierigste Messung, die sich auf den Brechungsindex von Luft bezieht, ist die Messung von Indexfluktuationen über einem Meßpfad unbekannter oder variabler Länge, wo Temperatur und Druck nicht gesteuert sind. Derartige Umstände treten häufig in geophysikalischen und meteorologischen Überwachungs-
vorrichtungen auf, wo die Atmosphäre offensichtlich unkontrolliert ist und der Brechungsindex sich dramatisch infolge von Änderungen der Luftdichte und Luftzusammensetzung verändern kann. Dieses Problem ist in dem folgenden Artikel diskutiert: "Effects of the atmospheric phase fluctuation on longdistance measurement" von H. Matsumoto und K. Tsukahara in: *Appl. Opt.* 23(19), 3388—3394 (1984), sowie in dem Artikel "Optical path length fluctuation in the atmosphere" von G. N. Gibson et al. in: *Appl. Opt.* 23(23), 4383—4389 (1984).

Ein weiteres Beispiel der Messung des Brechungsindex von Luft ist die hochpräzise Abstandsmessungs-Interferometrie, wie diese für mikrolithographische Herstellung integrierter Schaltungen benutzt wird. In diesem Zusammenhang wird auf den folgenden Artikel Bezug genommen: "Residual errors in laser interferometry from air turbulence and non-linearity" von N. Bobroff in: *Appl. Opt.* 26(13), 2676—2682 (1987), sowie auf den Artikel "Recent advances in displacement measuring interferometry" von N. Bobroff in: *Measurement science & tech.* 4(9), 907—926 (1993). Im typischen Fall liegt die Korrektur des Brechungsindex für Indexfluktuationen in der Größenordnung von 0,1 ppm (parts per million) und muß eine Genauigkeit von 0,005 ppm haben. Diese hohen Präzisionserfordernisse benötigen frequenzstabilisierte Laserquellen und eine hochauflösende Phasendetektion.

Es gibt häufig Referenzen im Stande der Technik im Hinblick auf heterodyne Verfahren der Phasenabschätzung, bei denen die Phase sich zeitlich auf nicht kontrollierbare Weise ändert. Beispielsweise sendet bei einem bekannten Überlagerungs-Entfernungsmeß-Interferometer die Quelle zwei orthogonal polarisierte Strahlen aus, die etwas unterschiedliche optische Frequenzen (beispielsweise 2 MHz) aufweisen. Der interferometrische Empfänger besteht in diesem Fall aus einem linearen Polarisator und einem Photodetektor, um das sich zeitlich ändernde Interferenzsignal zu messen. Das Signal schwingt mit der Schwebungsfrequenz, und die Phase des Signals entspricht der relativen Phasendifferenz.

Ein weiteres repräsentatives Beispiel des Standes der Technik bei der Überlagerungs-Distanzmeß-Interferometrie findet sich in der US-A-4 688 940. Diese bekannten Ausbildungen der interferometrischen Metrologie sind beschränkt auf Fluktuationen im Brechungsindex und in sich ungeeignet für die nächste Generation mikrolithographischer Instrumente.

Eine weitere bekannte Form eines Interferometers zur Abstandsmessung ist in der US-A-4 005 936 beschrieben. Das Verfahren besteht darin, Laserstrahlen mit zwei unterschiedlichen Wellenlängen zu benutzen, von denen jeder in zwei Teile aufgespalten wird. In den einen Teil der jeweiligen Strahlen wird eine Frequenzverschiebung eingeführt. Ein Teil eines jeden Strahls wird von einem Gegenstand reflektiert und mit dem anderen Teil auf einem Photodetektor wieder kombiniert, um ein Interferenzsignal zu erzeugen. Aus dem Interferenzsignal des Detektors wird eine Differenzfrequenz abgeleitet, deren Phase ein Maß für den Abstand nach der Oberfläche ist. Die äquivalente Wellenlänge der Phase, die der Differenzfrequenz zugeordnet ist, ist gleich dem Produkt von den beiden Laserwellenlängen geteilt durch die Differenz der beiden Wellenlängen. Diese Zwei-Wellenlängen-Technik vermindert Meßfehler, aber sie ist wenigstens ebenso empfindlich gegenüber störenden Effekten von Indexfluktuationen der Luft wie die Einzel-Wellenlängen-Technik.

Ein weiteres Beispiel eines Zwei-Wellenlängen-Interferometers gemäß der obengenannten US-PS 4 005 936 ist in der US-A-4 907 886 beschrieben. Dieses System ist auch in dem folgenden Artikel veröffentlicht: "Two-wavelength laser interferometry using superheterodyne detection" von R. Dändliker, R. Thalmann und D. Prongue in: *Opt. Lett.* 13(5), 339—341 (1988), und weiter in dem Artikel "High-accuracy distance measurements with multiple-wavelength interferometry" von R. Dändliker, K. Hug, J. Politch und E. Zimmermann. Das System von Dändliker et al., wie dies in der US-A-4 907 886 beschrieben ist, benutzt Laserstrahlen mit zwei Wellenlängen, wobei jeder Strahl zwei Polarisationskomponenten aufweist, die in ihrer Frequenz durch eine akusto-optische Modulation getrennt sind. Nachdem diese Strahlen colinear durch ein Michelson-Interferometer hindurchgetreten sind, werden die Polarisationskomponenten gemischt, was zu einem Überlagerungssignal führt, wobei das Überlagerungssignal eine unterschiedliche Frequenz für jede der beiden Wellenlängen besitzt, und daraus resultiert ein sogenanntes Super-Heterodyne-Signal mit einer Frequenz gleich der Differenz der Überlagerungsfrequenzen und eine Phase, die einer äquivalenten Wellenlänge zugeordnet ist, die gleich ist dem Produkt der beiden Laserwellenlängen dividiert durch die Differenz der beiden Wellenlängen. Gemäß der US-A-4 907 886 wird angenommen, daß die Phase des super-heterodynischen Signals nur von der Lage eines Meßobjektes und der äquivalenten Wellenlänge abhängt. Daher ist dieses System auch nicht geeignet zur Messung oder

THIS PAGE BLANK (USTC)

Kompensation von Fluktuationen im Brechungsindex der Luft.

Weitere Beispiele der Zwei-Wellenlängen-Überlagerungs-Technik finden sich in einem Artikel unter der Bezeichnung "Two-wavelength double heterodyne interferometry using a matched grating technique" von Z. Sodnik, E. Fischer, T. Ittner und H. J. Tiziani in: Appl. Opt. 30(22), 3139—3144 (1991), und in einem Artikel unter dem Titel "Diode laser and fiber optics for dual-wavelength heterodyne interferometry" von S. Manhart und R. Maurer in: SPIE 1319, 214—216 (1990). Keines dieser Beispiele ist jedoch auf das Problem der Indexfluktuationen gerichtet.

Aus dem vorstehenden kann geschlossen werden, daß der Stand der Technik auf dem Gebiet der heterodynen und superheterodynen Interferometrie kein befriedigendes Verfahren und keine Mittel zur Messung und Kompensation der Fluktuation des Brechungsindex der Luft aufzeigt. Dieser Mangel beim Stande der Technik führt zu einer beträchtlichen Meßungewißheit, wodurch die Präzision der Systeme schwerwiegend beeinträchtigt wird, die derartige Interferometer beispielsweise bei der mikrolithographischen Herstellung integrierter Schaltkreise benutzen. Infolgedessen werden zukünftige Interferometer notwendigerweise ein erfindungsgemäßes neues Verfahren und Mittel aufweisen müssen, um Fluktuationen des Brechungsindex zu messen und zu kompensieren.

Eine bekannte Möglichkeit, um Indexfluktuationen festzustellen, ist die Messung von Druckänderungen und Temperaturänderungen längs des Meßweges und die Berechnung ihrer Auswirkung auf den Brechungsindex des Pfades. Mathematische Gleichungen zur Durchführung dieser Berechnung sind allgemein bekannt in einem Artikel unter der Bezeichnung "The refractivity of air" von F. E. Jones in: J. Res. NBS 86(1), 27—32 (1981), beschrieben. Eine Weiterentwicklung der Technik ist in einem Artikel unter der Bezeichnung "High-accuracy displacement interferometry in air" von W. T. Estler in: Appl. Opt. 24(6), 808—815 (1985), beschrieben. Leider liefert diese Technik nur angenäherte Werte und ist mühsam in der Anwendung, und es werden nur langsame globale Fluktuationen in der Luftdichte korrigiert.

Eine weitere mehr direkte Möglichkeit zur Feststellung von Indexfluktuationen über einen Pfad ist die Mehrfach-Wellenlängen-Distanzmessung. Das Grundprinzip ist das folgende: Interferometer und Laser-Radarmessungen der optischen Pfadlänge zwischen einem Bezugspunkt und einem Gegenstand erfolgen oft in der offenen Luft. Die optische Pfadlänge ist das integrierte Produkt des Brechungsindex und des physikalischen Pfades, der vom Meßstrahl durchlaufen wird. Insofern ändert sich der Brechungsindex mit der Wellenlänge, aber die physikalische Pfadlänge ist unabhängig von der Wellenlänge. Daher ist es allgemein möglich, die physikalische Pfadlänge von den Fluktuationen im Brechungsindex zu trennen, vorausgesetzt, daß das Instrument wenigstens zwei Wellenlängen benutzt. Die Änderung des Brechungsindex mit der Wellenlänge ist als Dispersion bekannt, und daher wird diese Technik im folgenden als Dispersionstechnik bezeichnet.

Die Dispersionstechnik zur Indexmessung hat eine lange Geschichte und liegt vor der Einführung des Laser. In einem Artikel "Long-path interferometry through an uncontrolled atmosphere" von K. E. Erickson in: J. Opt. Soc. Am. 52(7), 781—787 (1962), werden die Grundprinzipien beschrieben, und er liefert eine Analyse der Möglichkeit dieser Technik für geophysikalische Messungen. Weitere theoretische Vorschläge finden sich in einem Artikel "Correction of optical distance measurements for the fluctuating atmospheric index of refraction" von P. L. Bender und J. C. Owens in: J. Geo. Res. 70(10), 2461—2462 (1965).

Kommerzielle Distanzmeßvorrichtungen auf Laser-Radar-Basis mit Dispersionstechnik zur Indexkompensation erschienen in den siebziger Jahren. Ein Artikel "Two-laser optical distance-measuring instrument that corrects for the atmospheric index of refraction" von K. B. Earnshaw und E. N. Hernandez in: Appl. Opt. 11(4), 749—754 (1972), beschreibt ein Instrument, welches durch Mikrowellen modulierte HeNe- und HeCd-Laser verwendet, die über einen Meßpfad von 5 bis 10 km arbeiten. Weitere Einzelheiten dieses Instruments finden sich in einem Artikel "Field Tests of a two-laser (4416 Å and 6328 Å) optical distance-measuring instrument correcting for the atmospheric index of refraction" von E. N. Hernandez und K. B. Earnshaw in: J. Geo. Res. 77(35), 6994—6998 (1972). Weitere Beispiele von Anwendungen der Dispersionstechnik sind in einem Artikel diskutiert, der wie folgt lautet: "Distance corrections for single- and dual-color lasers by ray tracing" von E. Berg und J. A. Carter in: J. Geo. Res. 85(B11), 6513—6520 (1980), und in einem Artikel mit der Bezeichnung "A multi-wavelength distance-measuring instrument for geophysical experiments" von L. E. Slater und G. R. Huggett in: J. Geo. Res. 81(35), 6299—6306 (1976).

Obgleich die Instrumente für geophysikalische Messungen im typischen Fall ein intensitätsmoduliertes Laser-Radar benutzen, ist es klar, daß die optische Interferenzphasendetektion für kürzere Entfernungen zweckmäßiger ist. In der US-A-3 647 302 mit der Bezeichnung "Apparatus for and method of obtaining precision dimensional measurements" ist ein bekanntes interferometrisches Versetzungsmeßsystem beschrieben, welches Mehrfach-Wellenlängen benutzt, um Änderungen der Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Feuchtigkeit und Druck zu kompensieren. Das bekannte Instrument ist speziell zur Arbeitsweise in Verbindung mit einem beweglichen Objekt ausgebildet, d. h. mit einer veränderlichen Physikalischen Pfadlänge. Diese bekannte Phasendetektion ist jedoch unzulänglich genau für hochpräzise Messungen.

Ein moderneres und detailliertes Beispiel ist das System, das von Y. Zhu, H. Matsumoto und T. Ohshi in einem Artikel beschrieben wird unter dem Titel "Long-arm two-color interferometer for measuring the change of air refractive index" in: SPIE 1319. Optics in complex Systems, 538—539 (1990). Das System benutzt einen 1064 nm-Wellenlängen-YAG-Laser und einen 632 nm-HeNe-Laser zusammen mit einer Gegen-Phasendetektion. Im wesentlichen das gesamte Instrument wurde in Japanisch in einem früheren Artikel von Zhu et al. beschrieben mit dem Titel "Measurement of atmospheric Phase and intensity turbulence for long-path distance interferometer". Proc. 3rd meeting on lightwave sensing technology, in: Appl. Phys. Soc. of Japan, 39 (1989). Jedoch besitzt das Interferometer von Zhu et al. eine unzureichende Auflösung für alle Anwendungen, d. h. eine Sub-Mikron-Interferometrie für Mikrolithographie.

Ein neuerer Versuch einer hochpräzisen Interferometrie für die Mikrolithographie findet sich in der US-

PS 4 948 254 von A. Ishida. Eine ähnliche Vorrichtung wird von Ishida in einem Artikel beschrieben "Two wavelength displacement-measuring interferometer using Second-harmonic light to eliminate air-turbulence-induced errors" in: Jpn. J. Appl. Phys. 28(3), L473—475 (1989). In dem Artikel wird ein eine Versetzung messendes Interferometer beschrieben, welches die Fehler eliminiert, die durch Fluktuationen im Brechungsindex verursacht wurden, und zwar erfolgt dies durch eine Zwei-Wellenlängen-Dispersionsdetektion. Ein Ar^+ -Laser liefert beide Wellenlängen gleichzeitig über einen Frequenzverdopplerkristall, welcher allgemein als BBO bezeichnet wird. Die Benutzung eines BBO-Verdopplungskristalls resultiert in zwei Wellenlängen, die grundsätzlich phasestarr sind. Dadurch wird die Stabilität und die Genauigkeit der Brechungsindexmessung beträchtlich verbessert. Die Phasendetektormittel, die einfache homodyne Gegenphasendetektion benutzen, sind jedoch unzureichend für hochauflösende Phasenmessungen. Außerdem sind die Mittel zur Phasendetektion und zur Signalverarbeitung nicht für dynamische Messungen geeignet, bei denen die Bewegung des Gegenstandes zu rapiden Veränderungen der Phase führt, die schwierig genau festzustellen sind.

In der US-PS 5 404 222 ist unter dem Titel "Interferometric measuring system with air turbulence compensation" ein weiterer bekannter Stand der Technik in Form eines Zwei-Wellenlängen-Interferometers beschrieben, das die Dispersionstechnik benutzt, um Indexfluktuationen festzustellen und zu kompensieren. Eine ähnliche Vorrichtung wird von S. A. Lis in einem Artikel beschrieben "An air turbulence compensated interferometer for IC manufacturing" in: SPIE 2440 (1995). Eine Verbesserung des US-Patents 5 404 222 findet sich in der US-PS 5 537 209. Die prinzipielle Neuerung dieses Systems gegenüber jenem, das von Ishida in Jpn. J. Appl. Phys. (oben erwähnt) vorgeschlagen wurde, ist der Zusatz eines weiteren BBO-Verdopplungskristalls, um die Präzision des Phasendetektors zu verbessern. Das zusätzliche BBO-Kristall macht es möglich, optisch zwei Strahlen zur Interferenz zu bringen, deren Wellenlängen genau um einen Faktor von Zwei unterschieden sind. Die resultierende Interferenz besitzt eine Phase, die direkt abhängig ist vom Brechungsindex, die aber im wesentlichen unabhängig ist von der Bewegung. Das von Lis vorgeschlagene System hat jedoch den Nachteil, daß es kompliziert aufgebaut ist und ein zusätzliches BBO-Kristall für jeden Meßpfad erfordert. In der Mikrolithographie sind häufig sechs oder mehr Meßpfade erforderlich, und jenes BBO kann mehr als \$ 12 000 kosten, so daß die zusätzlichen Kristalle einen bedeutenden zusätzlichen Kostenaufwand erfordern. Ein weiterer Nachteil des Lis-Systems besteht darin, daß es ein langsames (32 Hz) Phasendetektorsystem benutzt, das auf der physikalischen Versetzung eines PZT-Wandlers beruht.

Aus den obigen Ausführungen wird klar, daß im Stande der Technik kein praktikables Verfahren hoher Geschwindigkeit und hoher Präzision mit entsprechenden Mitteln vorhanden ist, um Fluktuationen im Brechungsindex von Luft zu messen und zu kompensieren. Die Beschränkungen im Stande der Technik beruhen prinzipiell auf den folgenden ungelösten technischen Schwierigkeiten: (1) Bekannte heterodyne und superheterodyne Interferometer sind in ihrer Genauigkeit durch Fluktuationen im Brechungsindex von Luft begrenzt; (2) bekannte Dispersionstechniken zur Messung von Indexfluktuationen erfordern eine extrem hohe Genauigkeit in der Interferenzphasenmessung, die im typischen Fall eine Größenordnung der typischen Genauigkeit von hochpräzisen Entfernungsmeß-Interferometern übersteigt; (3) naheliegende Modifikationen bekannter Interferometer zum Zwecke der Verbesserung der Phasenmeßgenauigkeit würden die Meßzeit auf eine Dauer erhöhen, die nicht kompatibel ist mit der Schnelligkeit der Bewegung in einer modernen mikrolithographischen Ausrüstung; (4) die bekannte Dispersionstechnik erfordert wenigstens zwei extrem stabile Laserquellen, oder eine einzige Quelle, die mehrere phasenstarre Wellenlängen abstrahlt; (5) bekannte Dispersionstechniken in der Anwendung der Mikrolithographie sind empfindlich gegenüber einer Bewegung während der Messung, was zu Systemfehlern führt; (6) bekannte Dispersionstechniken, die Verdopplungskristalle (beispielsweise US-PS 5 404 222) als Teil des Detektorsystems benutzen, sind kostspielig und kompliziert.

Diese Schwierigkeiten im Stande der Technik haben zu einem Fehlen irgendeines praktischen interferometrischen Systems geführt, das eine Versetzungsmessung für die Mikrolithographie in Gegenwart von Indexfluktuationen ermöglicht.

Zusammenfassung der Erfindung

Gemäß der vorliegenden Erfindung werden eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Messung von Fluktuationen im Brechungsindex eines Gases in einem Meßpfad geschaffen, beispielsweise für Zwecke der Distanzmessungs-Interferometrie, unabhängig von den Fluktuationen, und gemäß der Erfindung sind folgende Teile vorgesehen: (1) eine Quelle von wenigstens zwei Lichtstrahlen mit unterschiedlichen Wellenlängen, wobei die Wellenlängen eine bekannte angenäherte harmonische Beziehung zueinander oder zu einer gemeinsamen Bezugswellenlänge haben; (2) Mittel zur Einführung einer Frequenzdifferenz zwischen die beiden orthogonal polarisierten Zustände eines jeden Lichtstrahls, wobei die Frequenzdifferenz für wenigstens zwei Strahlen unterschiedlich ist; (3) optische Mittel zur Ausrichtung sämtlicher Lichtstrahlen in einen einzigen Strahl, so daß sie im wesentlichen kollinear sind und einen im wesentlichen gleichen Durchmesser längs des Meßpfades aufweisen; (4) optische Mittel zur Erzeugung von phasenverschobenen Strahlen durch Einführung einer Phasenverschiebung zwischen den Polarisationszuständen von jedem der Lichtstrahlen, wobei die Größe der Phasenverschiebungen proportional zum Produkt der physikalischen Länge des Meßpfades und der Brechungsindizes des Gases im Meßpfad ist und die Brechungsindizes eine Funktion der Wellenlänge und unterschiedlich für jeden phasenverschobenen Strahl ist; (5) Mittel, vorzugsweise in Gestalt eines Polarisators, zur Mischung der Polarisationskomponenten eines jeden phasenverschobenen Lichtstrahls zur Erzeugung von zwei oder mehreren gemischten Ausgangsstrahlen; (6) Mittel, vorzugsweise in Gestalt eines photoelektrischen Detektors, um heterodyne elektrische Signale von den Intensitäten der gemischten Ausgangsstrahlen zu erlangen, wobei die heterodynen elektrischen Signale durch Schwingungen bei heterodynen Frequenzen charakterisiert sind, bezogen auf die Frequenzdifferenzen zwischen den Polarisationszuständen der Lichtstrahlen, wobei die heterodynen elektrischen Signale

außerdem durch heterodyne Phasen gekennzeichnet sind; (7) Mittel, vorzugsweise elektronischer Art, zur Verarbeitung der heterodynen elektrischen Signale zur Erzeugung modifizierter heterodyner Signale, gekennzeichnet durch modifizierte heterodyne Phasen, die harmonisch auf die heterodynen Phasen bezogen sind; (8) Mittel, vorzugsweise elektronischer Art, zur Mischung von je zwei der modifizierten heterodynen elektrischen Signale zur Erzeugung wenigstens eines superheterodynen elektrischen Signals, bestehend aus einem amplitudenmodulierten Träger mit einer superheterodynen Modulationsfrequenz gleich der Hälfte der Differenz der beiden entsprechenden modifizierten heterodynen Frequenzen und eine superheterodyne Modulationsphase gleich der halben Differenz zwischen zwei entsprechenden modifizierten heterodynen Phasen und (9) Mittel, vorzugsweise elektronischer Art, zur Analyse der superheterodynen Modulationsphase zur Bestimmung der Fluktuationen im Brechungsindex des Gases über den Meßpfad.

Die Hauptvorteile der Erfindung können wie folgt zusammengefaßt werden: Wenn die Quellen der Wellenlängen im wesentlichen harmonisch aufeinander bezogen sind, und die modifizierten heterodynen Phasenverschiebungen in gleicher Weise harmonisch aufeinander bezogen sind, dann schafft die Erfindung eine superheterodyne Modulationsphase, die im wesentlichen unempfindlich gegenüber einer Stufenbewegung ist. Diese superheterodyne Modulationsphase ist ein direktes Maß der Fluktuationen des Brechungsindex von Luft. Da die superheterodyne Modulationsfrequenz auf irgendeinen zweckmäßigen Wert eingestellt werden kann, kann die Phasenmeßgenauigkeit zur Kompensation von Indexfluktuationen in gleicher Weise verbessert werden. Diese Verbesserungen gegenüber dem Stande der Technik werden erreicht ohne teure optische Komponenten, beispielsweise Verdopplungskristalle oder dergleichen, und ohne irgendeine Beschränkung hinsichtlich der Schnelligkeit der Bewegung.

Ein abgewandeltes Ausführungsbeispiel der Erfindung umfaßt die Möglichkeit der Kompensation unerwünschter Fluktuationen in der Wellenlängenquelle, wobei zusätzliche Monitor-Interferometer benutzt werden und im wesentlichen die gleiche elektronische Verarbeitungsvorrichtung, wie sie im Primärgerät Anwendung fand. Das Monitor-Interferometer besitzt vorzugsweise eine feste Monitor-Pfadlänge mit einem sorgfältig gesteuerten Brechungsindex, so daß alle gemessenen Änderungen im Monitor beitragen und eine Messung der Wellenlängenzustabilisierung liefern.

Kurzbeschreibung der Zeichnung

In der Zeichnung bezeichnen gleiche Bezugszeichen gleiche Elemente.

Fig. 1 zeigt ein Schaltbild einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung,

Fig. 2 ist eine graphische Darstellung, die ein Schwebungssignal darstellt,

Fig. 3 zeigt ein Blockschaltbild der Verarbeitungselektronik,

Fig. 4 ist ein Schaltbild einer abgewandelten Ausführungsform der Erfindung.

Einzelbeschreibung der Ausführungsbeispiele

Fig. 1 zeigt ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Messung von Fluktuationen im Brechungsindex eines Gases innerhalb eines Meßpfades 66, und eine derartige Vorrichtung ist zweckmäßig zur Messung der Versetzung eines Gegenstandes 67, unabhängig von derartigen Fluktuationen.

Gemäß einem bevorzugten Verfahren nach der Erfindung durchläuft ein Lichtstrahl 11, der von einer Quelle 1 emittiert wird, einen Modulator 2, der durch einen Treiber 3 erregt wird. Die Quelle 1 ist vorzugsweise ein Laser oder eine ähnliche Quelle kohärenter Strahlung, die vorzugsweise polarisiert ist, und der Strahl besitzt eine Wellenlänge λ_1 . Der Modulator 2 kann beispielsweise ein akustooptischer Wandler sein, oder eine Kombination eines akustooptischen Wandlers mit einer zusätzlichen Optik zur selektiven Modulation der Polarisationskomponenten des Strahls 11. Der Modulator 2 verschiebt die Oszillationsfrequenz einer linearen Polarisationskomponente des Strahls 11 um einen Betrag f_1 gegenüber einer orthogonalen linearen Polarisationskomponente, wobei die Polarisationskomponenten hierbei mit x bzw. y bezeichnet sind. Demgemäß besitzt nach Durchlaufen des Modulators 2 die x-Polarisationskomponente des Strahls 11 eine Oszillationsfrequenz, die um den Betrag f_1 gegenüber der y-Polarisationskomponente des Strahls 11 nach oben verschoben ist.

In einem nächsten Schritt durchläuft ein Strahl 12, der von einer Quelle 4 emittiert ist, einen Modulator 5, der durch einen Treiber 6 erregt wird, ähnlich dem Modulator 2 bzw. dem Treiber 3. Die Quelle 4 ist ebenso wie die Quelle 1 vorzugsweise ein Laser oder eine ähnliche Quelle polarisierter kohärenter Strahlung, aber vorzugsweise mit einer unterschiedlichen Wellenlänge λ_2 , die eine bekannte annähernde harmonische Beziehung gegenüber der Wellenlänge λ_1 hat, das heißt:

$$p_1 \lambda_2 \approx p_2 \lambda_1$$

für

$$p_1, p_2 = 2, 3, \dots, p_1 \neq p_2 \quad (1)$$

Nach Durchlaufen des Modulators 5 besitzt die x-Polarisationskomponente des Strahls 12 eine Oszillationsfrequenz, die um einen Betrag f_2 gegenüber der Polarisationskomponente des Strahls 12 nach oben verschoben ist.

Für den Fachmann ist es klar, daß die Strahlen 11 und 12 alternativ von einer einzigen Laserquelle geliefert werden können, die mehr als eine Wellenlänge emittiert, oder durch einen einzigen Laser, der mit einer optischen Frequenzverdopplungsvorrichtung versehen ist, oder durch irgendeine äquivalente Strahlungskonfiguration, die in der Lage ist, Lichtstrahlen mit zwei oder mehr Wellenlängen zu erzeugen. Es ist außerdem für den Fachmann klar, daß eine oder beide Frequenzverschiebungen f_1, f_2 das Ergebnis einer Zeeman-Aufspaltung oder einer

ähnlichen Phänomencharakteristik der Laserquellen selbst sein können.

In einem nächsten Schritt werden die Strahlen 11 und 12 durch ein optisches Element 9, vorzugsweise durch einen nicht polarisierenden Strahlteiler, zu einem Teststrahl 13 kombiniert. In einem weiteren Schritt breitet sich der Teststrahl 13 nach einem Interferometer 60 aus, das aus optischen Mitteln besteht, um eine Phasenverschiebung φ_1 zwischen die x- und y-Polarisationskomponenten des Strahls 13 einzuführen, entsprechend der Wellenlänge λ_1 , und eine Phasenverschiebung φ_2 zwischen den x- und y-Polarisationskomponenten des Strahls 13, entsprechend der Wellenlänge λ_2 . Die Größen der Phasenverschiebungen φ_1 , φ_2 sind auf eine runde physikalische Länge L des Meßpfades 66 gemäß der folgenden Formel bezogen:

$$\varphi_j = L k_j n_j + \zeta_j \text{ für } j = 1, 2 \quad (2)$$

wobei die Wellennummern k_j gegeben sind durch

$$k_j = 2\pi/\lambda_j \quad (3)$$

und die Brechungsindizes n_j des Gasmeßpfades 66 den Wellenlängen λ_j entsprechen. Die Phasenversetzungen ζ_j enthalten alle Bestandteile der Phasenverschiebungen φ_j , die nicht auf den Meßpfad 66 bezogen sind.

Wie in Fig. 1 dargestellt, und wie dies zu bevorzugen ist, weist das Interferometer 60 einen Bezugsspiegel 65, eine Viertelwellenplatte 21, eine Viertelwellenplatte 22, einen Polarisierungsstrahlspalter 23 und den Gegenstand 67 auf. Diese Konfiguration ist im Stand der Technik bekannt als polarisiertes Michelson-Interferometer und ist als einfache Illustration dargestellt. Ein Winkelkompensations-Interferometer oder eine ähnliche Vorrichtung, wie diese in einem Artikel "Differential interferometer arrangements for distance and angle measurements: Principles, advantages and applications" von C. Zanoni in: VDI Berichte Nr. 749, S. 93, 1989, beschrieben ist, wird vorzugsweise in die Vorrichtung nach der Erfindung eingebaut, wenn mit Entwicklungsabschnitten gearbeitet wird, die in der mikrolithographischen Fabrikation integrierter Schaltungen anzutreffen sind. Andere Formen von Interferometern, wie sie in dem obengenannten Artikel "Differential interferometer arrangements for distance and angle measurements: Principles, advantages and applications" von C. Zanoni in: VDI Berichte Nr. 749, S. 93, 1989, beschrieben sind, können in der erfindungsgemäßen Vorrichtung gemäß Fig. 1 eingebaut werden, ohne wesentlich von der Idee der vorliegenden Erfindung abzuweichen.

Nach Durchlaufen des Interferometers 60 wird aus dem Teststrahl 13 ein phasenverschobener Strahl 15, der durch einen Polarisator 44 hindurchtritt, welcher vorzugsweise so orientiert ist, daß die Polarisationskomponenten x und y des Strahls 15 vermischt werden. Ein herkömmlicher dichroitischer Strahlteiler 80 trennt vorzugsweise jene Abschnitte des Strahls 15, die die Wellenlängen λ_1 und λ_2 enthalten, in zwei Strahlen 16 bzw. 17. Diese Strahlen 16, 17 treffen dann auf Photodetektoren 45 bzw. 46, was zu zwei heterodyn Interferenzsignalen s_1 , s_2 führt, die den beiden Wellenlängen λ_1 , λ_2 entsprechen und die folgende Form haben:

$$s_j = \cos(\alpha_j(t)) \text{ für } j = 1, 2 \quad (4)$$

Dabei sind die zeitabhängigen Argumente $\alpha_1(t)$, $\alpha_2(t)$ der heterodyn Interferenzsignale s_1 , s_2 gegeben durch:

$$\alpha_j(t) = 2\pi f_j t + \varphi_j \quad (5)$$

und die Signalamplitude hat sich zu Eins normalisiert, und alle konstanten Versetzungswerte wurden durch elektronische Vorbehandlungsmittel (nicht dargestellt) ausgefiltert. Die Überlagerungs-Interferenzsignale s_1 , s_2 werden der elektronischen Verarbeitungsvorrichtung 98 zur Analyse zugeführt.

Nunmehr wird auf Fig. 3 Bezug genommen. Die elektronische Verarbeitungsvorrichtung 98 umfaßt vorzugsweise Mittel 981 zur elektronischen Multiplikation der beiden zeitabhängigen Argumente $\alpha_1(t)$, $\alpha_2(t)$ der heterodyn Interferenzsignale s_1 , s_2 mit dem Koeffizienten p_1 , p_2 , um so zwei modifizierte heterodyne Signale \tilde{s}_1 , \tilde{s}_2 zu schaffen, die die folgende mathematische Form besitzt:

$$\tilde{s}_j = \cos(p_j \alpha_j(t)) \text{ für } j = 1, 2 \quad (6)$$

Diese Multiplikation kann durch irgendeine herkömmliche Frequenz-Multiplikationstechnik durchgeführt werden, wie sie auf diesem Gebiet bekannt ist, beispielsweise eine Quadrierung der Signale, gefolgt durch elektronische Filterung. Es ist für den Fachmann klar, daß derartige elektronische Multiplikationstechniken Versetzungen und Modifikationen der Signalstärke einführen können, die bei der vereinfachten Beschreibung der Analysetechnik vorliegender Erfindung vernachlässigt werden können. Es ist wichtig festzustellen, daß die Koeffizienten p_1 , p_2 vorzugsweise identisch den in gleicher Weise benoteten Koeffizienten p_1 , p_2 sind, die benutzt werden, um die annähernd harmonische Beziehung in der Gleichung (1) zu definieren.

Nunmehr wird wiederum auf Fig. 3 Bezug genommen. Die elektronische Verarbeitungsvorrichtung 98 umfaßt vorzugsweise Mittel 982 zur elektronischen Addition von zwei modifizierten heterodyn Signalen \tilde{s}_1 , \tilde{s}_2 , die zusammen ein superheterodynes Signal S erzeugen, das die folgende mathematische Form besitzt:

$$S = \tilde{s}_1 + \tilde{s}_2 \quad (7)$$

Dies kann geschrieben werden als

$$S = 2MC \quad (8)$$

wobei

$$c = \cos(2\pi vt + \vartheta) \quad (9)$$

$$M = \cos(2\pi Ft + \Phi) \quad (10)$$

und

$$v = \frac{1}{2}(p_1 f_1 + p_2 f_2) \quad (11)$$

$$\vartheta = \frac{1}{2}(p_1 \varphi_1 + p_2 \varphi_2)$$

$$F = \frac{1}{2}(p_1 f_1 - p_2 f_2) \quad (12)$$

$$\Phi = \frac{1}{2}(p_1 \varphi_1 - p_2 \varphi_2)$$

Das superheterodyne Signal S ist deshalb ein Trägersignal C der Frequenz v , moduliert durch ein Umhüllungs-signal M der Frequenz F . Für den Fachmann ist es klar, daß dann, wenn die heterodynen Signale s_1, s_2 eine unterschiedliche Amplitude haben, der resultierende mathematische Ausdruck komplizierter wird, aber nichtsdestoweniger in Ausdrücken eines Trägersignals geschrieben werden kann, das durch ein Umhüllungssignal moduliert ist. Zur Vereinfachung der vorliegenden Offenbarung wird angenommen, daß die modifizierten heterodynen Signale s_1, s_2 die gleiche Amplitude besitzen.

Nunmehr wird weiter auf Fig. 3 Bezug genommen. Die elektronische Verarbeitungsvorrichtung 98 weist vorzugsweise Mittel 983 auf, um das Umhüllungssignal M vom Trägersignal C zu trennen, und zwar unter Benutzung einer Gleichrichtung und Filterung, einer Signalquadrierung oder irgendeiner gleichartigen Technik, um eine Amplitudenmodulation zu extrahieren und einen Träger zu demodulieren. Die elektronische Verarbeitungsvorrichtung 98 umfaßt außerdem Mittel 985, um die Modulationsphase Φ zu bestimmen, und zwar unter Benutzung einer herkömmlichen, auf der Zeit basierenden Phasendetektion oder dergleichen. Die elektronische Verarbeitungsvorrichtung 98 umfaßt außerdem Mittel 986 und Mittel 987, um die Phasen φ_1 bzw. φ_2 zu bestimmen.

Im nächsten Schritt überträgt die Verarbeitungsvorrichtung 98 die Werte der Modulationsphase Φ und Phasenverschiebungen φ_1, φ_2 entweder in digitaler oder analoger Form einem Computer 99. Der Computer 99 berechnet die Trägerphase ϑ und berechnet den Brechungsindex unter Benutzung der folgenden Formel:

$$n_1 = 1 + \frac{A}{L} (K\vartheta - \chi\Phi - Q) \quad (13)$$

wobei

$$A = \frac{2\Gamma}{(\chi^2 - K^2)} \quad (14)$$

$$K = \frac{1}{2}(p_1 k_1 - p_2 k_2) \quad (15)$$

$$\chi = \frac{1}{2}(p_1 k_1 + p_2 k_2) \quad (16)$$

$$\Gamma = \frac{n_1 - 1}{n_2 - n_1} \quad (17)$$

Die oben definierte Konstante Γ ist ein Maß der Dispersion des Brechungsindex der Luft. Wenn beispielsweise $\lambda_1 = 0,63 \mu\text{m}$ und $\lambda_2 = 0,33 \mu\text{m}$ ist, dann wird $\Gamma = 24$. Der Versetzungsfaktor Q wird definiert als:

$$Q = K\xi - \chi Z \quad (18)$$

wobei

$$\xi = \frac{1}{2}(p_1 \zeta_1 + p_2 \zeta_2) \quad (19)$$

$$Z = \frac{1}{2}(p_1 \zeta_1 - p_2 \zeta_2) \quad (20)$$

Für das gegenwärtig bevorzugte Ausführungsbeispiel der Erfindung wird Q als konstant betrachtet, oder wird durch rein elektronische Mittel (nicht dargestellt) überwacht.

Die Größen K und χ , die in die Gleichungen (15) bzw. (16) eingeführt wurden, werden als vakuum-superheterodyne Wellennummern bzw. als Vakuumträgerwellennummern bezeichnet. Diese Terminologie folgt logisch aus den folgenden Zwei-Phasen-Gleichungen, die gültig sind, wenn $n_1 = n_2 = 1$:

$$\vartheta = \chi L + \xi \quad (21)$$

$$\Phi = \chi L + Z \quad (22)$$

Aus dem gleichen Grunde werden die Größen ξ und Z , die in die Gleichungen (19), (20) eingeführt wurden, als Vakuumträgerphasenversetzung bzw. Vakuum-Superheterodyn-Phasenversetzung bezeichnet.

In einer Endstufe für solche Anwendungen, die sich auf Distanzmeß-Interferometrie beziehen, kann der berechnete Wert des Brechungsindex n_1 zusammen mit der Phasenverschiebung φ_1 benutzt werden, um den Abstand L unabhängig von Fluktuationen des Brechungsindex n_1 zu bestimmen, und zwar unter Benutzung der folgenden Formel:

$$L = \frac{\varphi_1 - \zeta_1}{k_1 n_1} \quad (23)$$

Für den Fachmann ist es ebenfalls klar, daß ähnliche Berechnungen in bezug auf n_2 durchgeführt werden können anstelle von n_1 oder zusätzlich zu n_1 .

Ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung wurde in den vorherigen Abschnitten beschrieben. Die der vorliegenden Erfindung zugrundeliegenden Vorteile werden deutlicher aus der folgenden Diskussion. Aus der Berechnung des Brechungsindex n_1 unter Benutzung der obigen Gleichung wird evident, daß die erforderlichen Genauigkeiten der Trägerphase ϑ und der superheterodyn Phase Φ auf den Wert der Trägerwellenzahl χ und der superheterodyn Wellenzahl K bezogen sind. Da die Frequenz F des Modulations-signals M sehr viel kleiner sein kann als die Frequenz ν des Trägersignals C , und da es allgemein einfacher ist, die Phase mit hoher Auflösung eines elektronischen Signals kleinerer Frequenz zu berechnen, ist es allgemein vorteilhafter, sich auf eine hochgenaue Messung der superheterodyn Modulationsphase Φ zu verlassen. Dies kann in der erfindungsgemäßen Vorrichtung leicht geschehen, wenn die Wellenlängen λ_1, λ_2 annähernd harmonisch bezogen sind, wie dies oben in der ersten Gleichung angegeben ist. Für den Grenzfall, wo λ_1, λ_2 ganzzahlige Vielfache voneinander sind, d. h. für den Grenzfall, wo

$p_1 \lambda_2 = p_2 \lambda_1$
für

$$p_1, p_2 = 2, 3, \dots, p_1 \neq p_2 \quad (24)$$

ist, wird die vakuum-superheterodyne Wellennummer K gleich Null, und die Brechungsindexberechnung braucht die Trägerphase ϑ nicht mit einzubeziehen, wie dies durch den folgenden Ausdruck belegt ist:

$$n_1 = 1 + \frac{A}{L} (\chi\Phi - Z) \quad \text{für} \quad K = 0 \quad (25)$$

Weiter ist für den Fall, wo $K = 0$, die superheterodyne Modulationsphase Φ auch nur schwach abhängig vom Abstand L im Gegensatz zu der sehr strengen Abhängigkeit der Trägerphase ϑ und der Phasenverschiebungen φ_1, φ_2 . Hierdurch wird die Phasendetektionsgenauigkeit zur Bewegung der Gegenstände in hohem Maße verbessert, wie dies allgemein bei einer mikrolithographischen Einrichtung erforderlich ist.

Eine wichtige Betrachtung im Hinblick auf die Interferometrie allgemein und die Dispersionstechnik insbesondere ist die Wellenlängeninstabilität der Quelle. Die Vorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung schafft eine zweckmäßige Möglichkeit der Kompensation der Wellenlängeninstabilität wie folgt. Durch mathematische Manipulation der Gleichung (13) ist es möglich zu zeigen, daß ein Fehler δn_1 im Brechungsindex, der zur Quellwellenlängeninstabilität beiträgt, gegeben ist durch:

$$\delta n_1 \approx \kappa A \delta K \quad (26)$$

Dabei ist δK die Instabilität der vakuum-superheterodyn Wellenzahl K. Diese Formel zeigt, daß die Größe des Fehlers im wesentlichen unabhängig ist von dem Objektstand L und daß sämtliche anderen Variablen, wie die Phasenverschiebungen φ_1, φ_2 direkt von der Gegenstands Entfernung L abhängen. Es ist daher möglich, die Wirkungen der Wellenlängeninstabilität durch Messung des Brechungsindex längs des Monitorpfades zu kompensieren, der völlig frei ist von wirklichen Fluktuationen im Brechungsindex. Alle gemessenen Veränderungen sind das Ergebnis der Wellenlängeninstabilität.

Nunmehr wird auf Fig. 4 Bezug genommen, wo ein abgewandeltes Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung dargestellt ist, wobei ein Monitorsystem 60b dem Ausführungsbeispiel nach Fig. 1 hinzugefügt wurde, um einen Fehler δn_1 in der Brechungsindexmessung zu kompensieren, der von der Wellenlängeninstabilität der Quelle abhängt. Ein Strahlteiler 70 und ein Spiegel 71 reflektieren einen Teil des Strahls 13 nach dem Monitorsystem 60b. Das Monitorsystem 60b umfaßt eine Zahl von Elementen, die analoge Operationen durchführen, die das Interferometer 60, und zwar mit Elementen, die die gleichen Operationen wie die Elemente des Interferometers 60 durchführen, wobei der Zusatz "b" verwendet wird, wenn sich auf Elemente des Monitorsystems 60b bezogen wird. Ein elektronisches Monitorverarbeitungssystem 98b führt in gleicher Weise Operationen wie das elektronische Verarbeitungssystem 98 durch. Der Unterschied zwischen dem Interferometer 60 und dem Monitorsystem 60b besteht darin, daß der Monitorpfad 66b des Monitorsystems 60b vorzugsweise eine feste Länge besitzt, und zwar mit einem sorgfältig gesteuerten Brechungsindex, wie dieser erlangt werden kann, indem der Monitorpfad 66b eingeschlossen und Temperatur und Druck des eingeschlossenen Volumens kontrolliert werden. Da der Brechungsindex längs des Monitorpfades 66b im wesentlichen konstant ist, tragen alle gemessenen Änderungen δn_M im Monitorsystem zur Wellenlängeninstabilität der Quelle bei. Bei diesem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung berechnet der Computer 99 vorzugsweise den Brechungsindex n_1 nach der folgenden Formel:

$$n_1 = 1 + \frac{A}{L} (K\vartheta - \chi\Phi - Q) - \delta n_M \quad (27)$$

Diese bevorzugte Kompensationstechnik der vorliegenden Erfindung vermindert in hohem Maße die Erfordernisse der Wellenlängenstabilität für die Quelle. Es ist insbesondere festzustellen, daß die vorliegende Erfindung keine absolute Wellenlängenstabilität erfordert und ein Monitorpfad 66b nicht eine außerordentlich stabile physikalische Länge L erfordert.

Die Vorteile der vorliegenden Erfindung sind die folgenden:

(1) Die vorliegende Erfindung bewirkt eine genaue Messung und eine Kompensation von Fluktuationen im Brechungsindex von Luft, so wie es zweckmäßig ist für eine Distanzmeß-Interferometrie; (2) die vorliegende Erfindung ist kompatibel mit der schnellen Stufenbewegung, die modernen mikrolithographischen Einrichtungen eigen sind; (3) die vorliegende Erfindung umfaßt außerdem leicht einzubauende Monitormittel und ein Verfahren, durch das die Stabilitätsanforderungen der Quelle wesentlich herabgesetzt werden; und (4) die Vorrichtung nach der vorliegenden Erfindung ist beträchtlich weniger kompliziert und kostspielig gegenüber vergleichbaren bekannten Anordnungen.

Es ist für den Fachmann klar, daß eine abgewandelte Datenverarbeitung benutzt werden kann, ohne vom Rahmen der Erfindung abzuweichen. Beispielsweise kann es sich als nützlich erweisen, modifizierte heterodyne

Signale \tilde{s}_1, \tilde{s}_2 zu multiplizieren, statt diese zu addieren, wie dies oben vorgeschlagen wurde, was zu dem Ausdruck führt:

$$S' = \tilde{s}_1, \tilde{s}_2 \quad (28)$$

Das alternative Signal S' kann erzeugt werden, indem der geeignete Wert im binomischen Ausdruck von $(s_1 + s_2)^{p+q}$ durch Benutzung einer phasempfindlichen Detektion gewählt wird. Statt dessen könnte das Signal S' aus der Summe statt aus dem Produkt von zwei Signalen bestehen, die die Frequenzen F und v haben. Eine derartige Verarbeitungstechnik würde beispielsweise vorteilhaft sein, wenn es sich als nützlich erwiese, die Detektoren 45, 46 und den dichroitischen Strahlteiler 80 in Fig. 1 durch einen einzigen Detektor zu ersetzen.

Es ist weiter für den Fachmann klar, daß alternative zusätzliche optische Elemente und elektronische Verarbeitungsschritte bei einem der beschriebenen Ausführungsbeispiele des erfindungsgemäßen Gerätes benutzt werden können. Beispielsweise können zusätzliche Detektoren und zugeordnete Elemente den Ausführungsbeispielen hinzugefügt werden, um die verschiedenen Phasenversetzungen, die bei der Datenverarbeitung auftreten, zu messen und zu kompensieren. Diese und andere naheliegende Modifikationen können eingeführt werden, ohne den Rahmen der vorliegenden Erfindung zu verlassen.

Patentansprüche

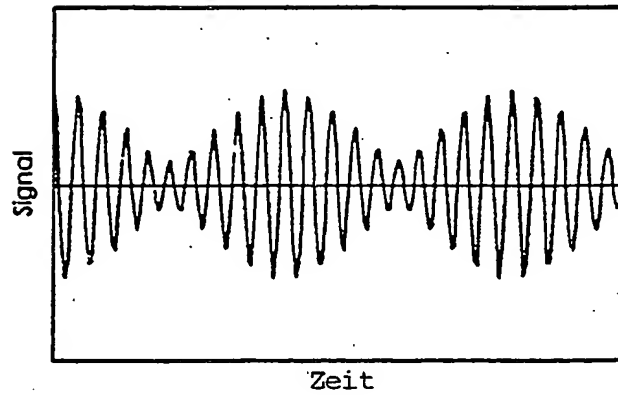
1. Vorrichtung zur Messung von Fluktuationen im Brechungsindex eines in einem Meßpfad befindlichen Gases mit den folgenden Merkmalen: eine Quelle von wenigstens zwei Lichtstrahlen mit unterschiedlichen Wellenlängen und einer im wesentlichen harmonischen Beziehung, wobei diese Lichtstrahlen jeweils senkrechte Polarisationszustände aufweisen; Mittel zur Ausrichtung des Lichtstrahls in einen einzigen, im wesentlichen kollinearen Lichtstrahl längs des Meßpfades; Mittel zur Erzeugung phasenverschobener Strahlen, wobei die Größe der Phasenverschiebung proportional zu einem Produkt aus physikalischer Länge des Meßpfades und Brechungsindex des Gases im Meßpfad ist; Mittel zur Vermischung der Polarisationskomponenten eines jeden der phasenverschobenen Strahlen zur Erzeugung vermischter Ausgangsstrahlen; Mittel zur Erzeugung heterodyner elektrischer Signale aus den Intensitäten der gemischten Ausgangsstrahlen, die Schwingungen heterodyner Frequenzen aufweisen, welche auf die Frequenzdifferenz zwischen den Polarisationszuständen der Lichtstrahlen bezogen sind und heterodyne Phasen aufweisen; Mittel zur Erzeugung modifizierter heterodyner Signale aus den heterodynen elektrischen Signalen, die modifizierte heterodyne Frequenzen umfassen, welche harmonisch auf die heterodynen Frequenzen und die modifizierten heterodynen Phasen bezogen sind, die harmonisch auf die heterodynen Phasen bezogen sind; Mittel zur Vermischung von wenigstens zwei der modifizierten heterodynen elektrischen Signale zur Erzeugung von wenigstens einem superheterodynen elektrischen Signal, welches aus einer superheterodynen Modulationsfrequenz besteht, die im wesentlichen gleich ist der halben Differenz der zwei entsprechenden modifizierten heterodynen Frequenzen und einer superheterodynen Modulationsphase, die im wesentlichen gleich ist der Hälfte der Differenz zwischen den beiden entsprechenden modifizierten heterodynen Phasen; und Mittel zur Analyse der superheterodynen Modulationsphase zur Bestimmung der Fluktuationen in dem Brechungsindex innerhalb des Meßpfades.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die Lichtstrahlen jeweils zwei orthogonal polarisierte Zustände besitzen und die die Frequenzdifferenz einführenden Mittel eine Einrichtung aufweisen, um die Frequenzdifferenz zwischen den beiden orthogonal polarisierten Zuständen eines jeden der Lichtstrahlen einzuführen, wobei die Frequenzdifferenz für wenigstens zwei Strahlen unterschiedlich ist.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die Mittel zum Ausrichten der Lichtstrahlen eine optische Einrichtung aufweisen, um sämtliche Lichtstrahlen in einen einzigen Lichtstrahl auszurichten.
4. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die Mittel zur Erzeugung der phasenverschobenen Strahlen eine Einrichtung aufweisen, um Phasenverschiebungen zwischen den Polarisationszuständen eines jeden der Lichtstrahlen einzuführen.
5. Vorrichtung nach Anspruch 4, bei welcher die Mittel zur Erzeugung der phasenverschobenen Strahlen eine optische Einrichtung aufweisen.
6. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die Mittel zur Erzeugung der phasenverschobenen Strahlen eine optische Einrichtung aufweisen.
7. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die Brechungsindizes eine Funktion der Wellenlänge sind und verschiedene Brechungsindizes für jeden phasenverschobenen Strahl aufweisen.
8. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die Mittel zur Vermischung der Polarisationskomponenten einen Polarisator aufweisen.
9. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die Mittel zur Erzeugung der heterodynen elektrischen Signale einen photoelektrischen Detektor aufweisen.
10. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die Mittel zur Vermischung von wenigstens zwei der modifizierten heterodynen elektrischen Signale eine Einrichtung aufweisen, um irgendwelche zwei der modifizierten heterodynen elektrischen Signale zu vermischen, um das wenigstens eine superheterodyne elektrische Signal zu erzeugen, welches einen amplitudenmodulierten Träger aufweist, der die superheterodyne Modulationsfrequenz hat.
11. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die Quelle eine Quelle kohärenter Strahlung ist.
12. Vorrichtung nach Anspruch 11, bei welcher die Quelle aus einem Laser besteht.
13. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher der Meßpfad einen Meßpfad in einem Interferometer aufweist.

14. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher das Gas Luft ist.
15. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die Mittel zur Erzeugung der modifizierten heterodynen Signale elektronische Mittel aufweisen.
16. Vorrichtung nach Anspruch 1, welche außerdem Mittel aufweist, um Fehler in der superheterodynen Modulationsphase zu kompensieren, die durch Fluktuationen in den Wellenlängen der Quelle erzeugt wurden.
17. Vorrichtung nach Anspruch 16, bei welcher die Kompensationsmittel ein Interferometer aufweisen, das einen Meßpfad besitzt, der aus einem Monitorpfad fester Länge besteht, wobei das Gas einen kontrollierten Brechungsindex besitzt.
18. Vorrichtung nach Anspruch 17, bei welcher die Kompensationsmittel außerdem eine Einrichtung aufweisen, um heterodyne Monitorsignale zu erzeugen, wobei diese Einrichtung zur Erzeugung der Monitorsignale außerdem Mittel aufweist, um modifizierte heterodyne Monitorsignale von den heterodynen Monitorsignalen zu erzeugen.
19. Vorrichtung nach Anspruch 18, bei welcher die Mittel zur Erzeugung der modifizierten heterodynen Monitorsignale elektronische Mittel umfassen.
20. Vorrichtung nach Anspruch 18, bei welcher die Kompensationsmittel außerdem eine Einrichtung aufweisen, um zwei der modifizierten heterodynen elektrischen Monitorsignale zu vermischen, um das wenigstens eine elektrische superheterodyne Monitorsignal zu erzeugen, wobei das superheterodyne Monitorsignal einen amplitudenmodulierten Träger umfaßt, der eine superheterodyne Monitormodulationsfrequenz besitzt.
21. Verfahren zur Messung von Fluktuationen im Brechungsindex eines Gases innerhalb eines Meßpfades, welches die folgenden Schritte umfaßt es werden Quelllichtstrahlen erzeugt, die Quellenwellenlängen längs des Meßpfades aufweisen, die im wesentlichen harmonisch aufeinander bezogen sind und modifizierte heterodyne Phasenverschiebungen erzeugen, die auf den Quellenwellenlängen beruhen, die in gleicher Weise harmonisch auf die harmonisch bezogenen Quellenwellenlängen bezogen sind, um eine superheterodyne Modulationsphase zu erzeugen, die im wesentlichen gegenüber einer Bewegung längs des Pfades unempfindlich ist.
22. Verfahren nach Anspruch 21, bei welchem das Gas Luft ist.
23. Verfahren nach Anspruch 21, bei welchem der Meßpfad einen Meßpfad innerhalb eines Interferometers aufweist, das eine längs des Meßpfades bewegliche Stufe besitzt, wobei der die superheterodyne Modulationsphase erzeugende Schritt einen Schritt umfaßt, in dem die superheterodyne Modulationsphase erzeugt wird, die im wesentlichen unempfindlich gegenüber den Bewegungen der Stufe im Meßpfad ist.
24. Verfahren nach Anspruch 21 mit dem weiteren Schritt der Bestimmung eines Abstandes L längs des Meßpfades unabhängig von Fluktuationen in dem Brechungsindex n.
25. Verfahren nach Anspruch 21, bei welchem der Entfernungsmeß-Schritt außerdem einen Schritt aufweist, um die Entfernung L gemäß dem folgenden Ausdruck zu bestimmen:

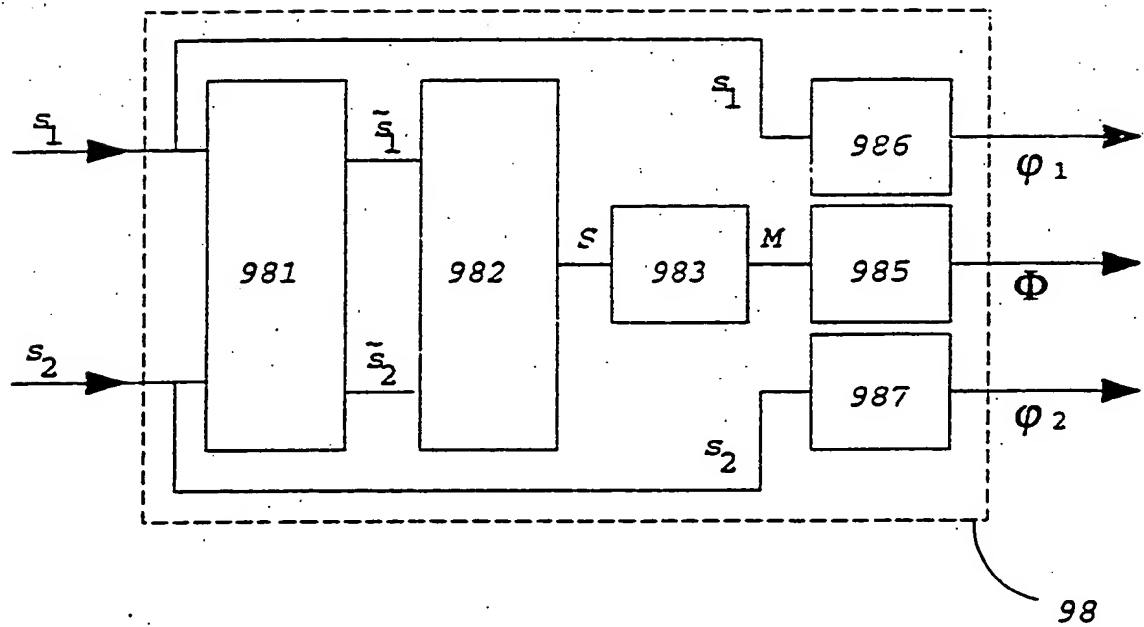
$$L = \frac{\varphi_1 - \zeta_1}{k_1 n_1}$$

- wobei φ_1 gleich der Größe der Phasenverschiebung ist, k_1 gleich der Wellennummer der Phasenverschiebung, n gleich dem Brechungsindex und ζ_1 gleich der Phasenversetzung ist, wobei die Phasenversetzung alle Anteile der Phasenverschiebung φ_1 umfaßt, die nicht auf den Meßpfad bezogen sind.
26. Verfahren nach Anspruch 21, bei welchem der Schritt zur Erzeugung der Quelllichtstrahlen den Schritt umfaßt, Quelllichtstrahlen mit orthogonaler Polarisierung zu erzeugen, die eine Frequenzdifferenz zwischen den orthogonalen Polarisationszuständen aufweisen und wobei in einem weiteren Schritt heterodyne Phasenverschiebungen modifiziert werden, basierend auf den Quellenwellenlängen, umfassend die Schritte der Erzeugung heterodyner elektrischer Signale, die Oszillationen mit heterodynen Frequenzen aufweisen, die auf Frequenzdifferenzen zwischen den Polarisationszuständen der Quelllichtstrahlen bezogen sind, wobei heterodyne modifizierte Signale aus den heterodynen elektrischen Signalen erzeugt werden, die die modifizierte heterodyne Phasenverschiebung umfassen.
27. Verfahren nach Anspruch 26, bei welchem der Schritt zur Erzeugung einen Schritt umfaßt, in dem elektronisch die modifizierten heterodynen Signale erzeugt werden, wobei das Verfahren weiter den Schritt einer elektronischen Addition der modifizierten heterodynen Signale umfaßt, um ein superheterodynes Signal zu erzeugen, welches die superheterodyne Modulationsphase aufweist.
28. Verfahren nach Anspruch 21, welches weiter den Schritt umfaßt, die Fehler in der superheterodynen Modulationsphase zu kompensieren, die durch Fluktuationen in den Quellenwellenlängen erzeugt wurden.

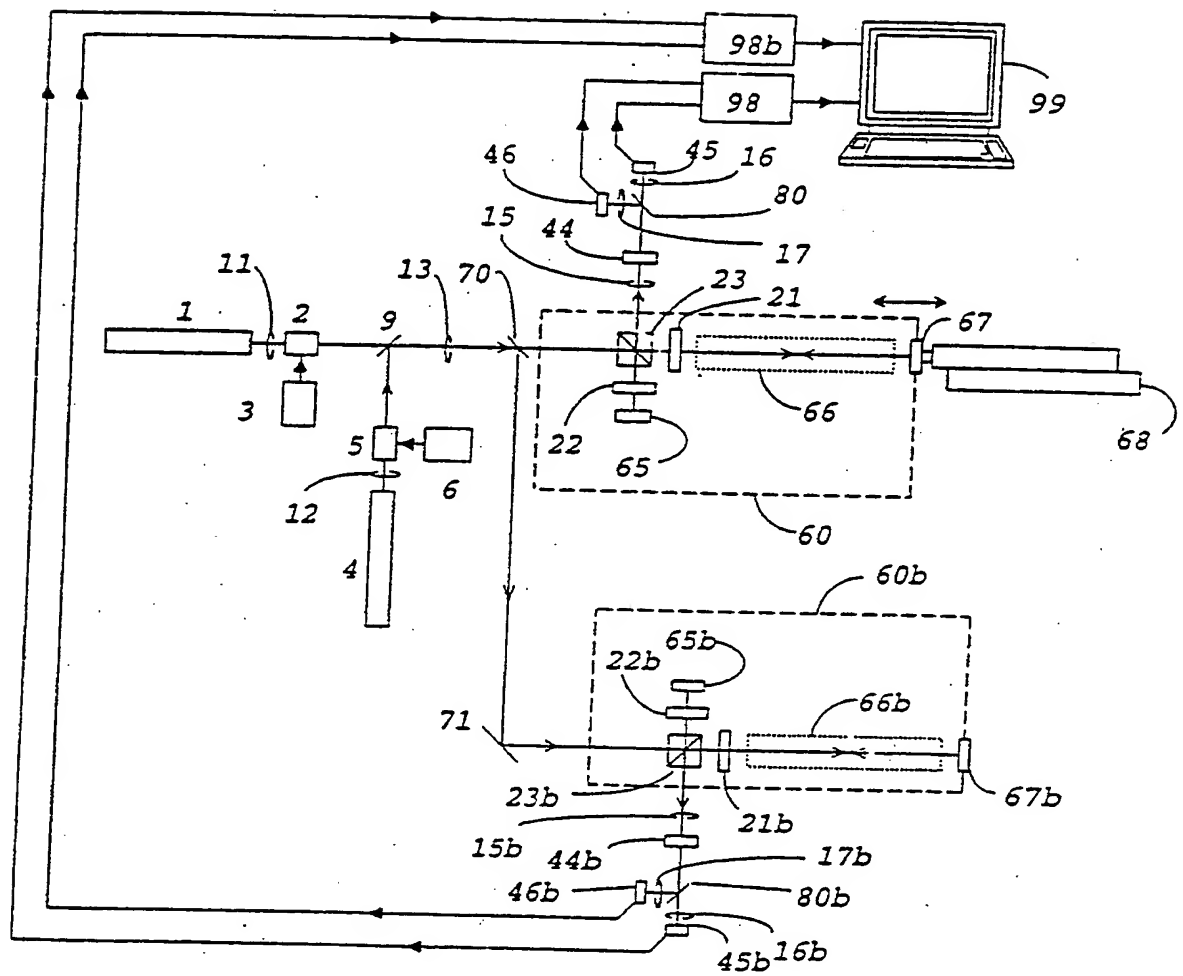
Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen



Figur 2



Figur 3



Figur 4